

ヒトによるコイン形状対象物把握動作の解析

白井 達也^{*}・野口 賢晃^{**}・富岡 巧^{*}

Analysis of Grasping Motion for Coin-Shaped Objects by Human

Tatsuya SHIRAI^{*}, Masaaki NOGUCHI^{**} and Takumi TOMIOKA^{*}

Multi-fingered robot hands have the potential capability of manipulating an object dexterously that is comparable with a human hand. While both theory and hardware have been extremely advanced during the last two decades, we can not yet see the situation where multi-fingered robot hands work practically in various environments. In this paper, we focus on a coin shaped object that it is difficult for even a human to grasp it from the surface of the table. Based on the observation of grasping motions by human, we had found out ten grasping patterns. We had shown a guideline-map for choosing the most appropriate strategy according to the environment where the coin shaped object is placed. We had also analyzed the sliding and the rotating motion in detail by using image measurement.

(Received September 15, 2006)

Key Words : Grasping motion, Coin-shaped object, Image measurement

1. はじめに

現在までに数多くのロボットハンドが研究、開発されてきた[1]-[5]. ロボットハンドの構造はグリップ式のハンドと多指ロボットハンドとに分けられる. グリップ式ハンドは1自由度の開閉機構しか持たないため対象物を操るような複雑な作業は実現できないが, 機構が簡単かつ制御が容易なため, 産業用ロボットのエンドエフェクタとして古くから実用化されている. それに対して図1に示すような複数の関節を備えた複数本の指からなる多指ロボットハンドは, 多くの自由度を有効に使うことにより指先で対象物を操ることや, 確実に対象物を拘束して保持することができる. 多指ロボットハンドは器用な動作を実現できる能力を持つ反面, 能力を十分発揮するには各指を動かすための制御戦略を準備する必要があるため, 実際の現場ではほとんど用いられていない. 長谷川らは, 多指ロボットハンドの指配置をヒトに倣うのではなく, 操り動作を安定的に行える配置および動作計画を解析的に求めている[6]. それに対し, 白井, 金子らはヒトの把握動作を参考にして, 一般的な構造の多指ロボットハンドでさまざまな形状, サイズの対象物に対して適用可能な把握戦略を開発した[7][8]. ただし, これらの研究では対象物の種類を対象物直径が指先直径よりも大きな比較的掴みやすい柱状物体に限定している.

本研究では日常生活で頻繁に使用するコイン形状の物体

に対する把握戦略に注目する. ヒトは幼児期には, テーブルの上に置かれたコインなどの微小物体を上手に持上げることができない. ヒトは経験を重ねるうちに徐々に技能が向上し, 無意識のうちに微小物体を把握できるようになる. 身体機能の成長も要因の一つだが, 何らかのテクニック(スキル)を獲得したと考えられる. スキルを解明するために, 白井, 金子ら[7][8]が行なった研究と同様に, ヒトの把握動作を観察し, その動作パターンを解析, なぜそのような戦略をヒトは選択するのかという動作の本質を抽出する. 本研究では, 特にコイン返却口のように壁面により制限された空間中からのコイン形状対象物の把握動作について調べた結果を報告する. 解析したスキルは, 多指ロボットハンドや動力義手による微小物体の把握戦略の構築などへの応用が期待できる. コイン返却口の形状と把握パターン間の関係を解析することで, コインの取り出し易いコイン返却口の設計指標も得られると期待できる.

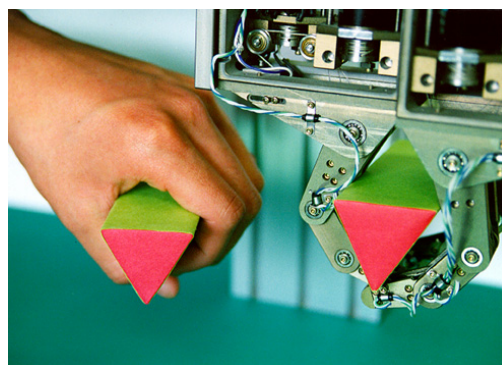


図1. 多指ロボットハンドの例 (Hiroshima Hand)

^{*}機械工学科

[Department of Mechanical Engineering]

^{**}三重大学大学院 (生物資源学研究科)

[Faculty of Bioresources, Mie University]

2. コイン形状微小物体および把握動作の定義

硬貨、パチンコ玉、シャープペンシルの芯といったヒトの指先半径より小さい対象物を微小物体と定義する。特に図2のようなコイン形状の対象物を研究対象とする。コインの直径 D_{obj} を高さ H_{obj} で正規化したパラメータ K_{obj} を(1)式のように定義する。

$$K_{obj} = \frac{H_{obj}}{D_{obj}} \quad (1)$$

K_{obj} が小さいほどコインは扁平な形状である。指の大きさに対するコインの相対的な大きさを表すパラメータ K_{tip} を(2)式のように定義する。

$$K_{tip} = \frac{H_{obj}}{D_{tip}} \quad (2)$$

ここで D_{tip} はヒトの示指指先直径である。ヒトによる把握実験では大きなコイン ($\phi 23.5$, 10 円玉) と小さなコイン ($\phi 20.0$, 1 円玉) の二種類のコインを対象物として用いた。大きなコインの K_{obj} は 0.0638, 小さなコインの K_{obj} は 0.0750 である。十名の被験者 (成人男性) の示指指先直径の平均から D_{tip} を 12.5[mm] とすると、大きなコインの K_{tip} も小さなコインの K_{tip} も 0.21 である。

実際のコイン返却口には、図3に示すように、さまざまな大きさ、形状のものが存在するが、本実験では、コイン返却口内部の空間形状は直方体、全ての壁面 (取出口手前側の斜面を除く) は平面で構成されており、表面の摩擦係数はコインを指先で押し付けて容易に滑らせられる程度に小さいものとする。初期状態でコインは図4(a)のようにコイン返却口の底面、ヒトの手はコイン返却口の外にあるものとする。片手のみ使用し、爪の使用は禁止する。コインをコイン返却口の外へ運び出し、図4(b)のように示指、母

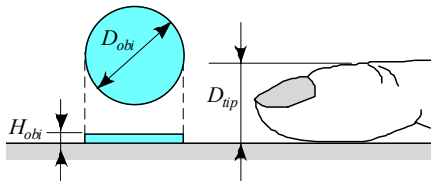


図2. コイン形状物体



図3. コイン返却口の例

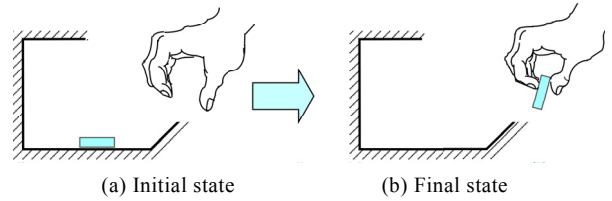


図4. 把握動作の定義

指による指先把握を完成させた状態を最終状態とする。

3. ヒトによる把握動作の解析

3.1 実験方法

本実験では被験者の手首の位置・姿勢および各指の挙動にのみ注目する。図5(a)に示すように被験者は椅子に座った状態でテーブル上のアクリル製のコイン返却口を模した模型 (以下、返却口模型) 内に置かれた1枚のコインを把握する。被験者左側にビデオカメラを設置し、コインを取り出す際の被験者の手指の挙動を撮影する。返却口模型奥側に斜め 45[deg]の角度で設置した鏡に映る鏡像も同時に撮影することで、図5(b)に例示するように、被験者正面の視点から見た挙動も同時に記録できる。被験者の手指の大きさの違いが実験結果に影響を与える可能性があるので、実験前に被験者の利き手のサイズを計る。

全被験者の把握実験終了後、ビデオカメラで撮影した各被験者の把握動作をビデオモニタ上で観察し、把握パターン进行分类する。分類したデータをもとに統計的手法を用いて返却口の形状と把握パターンの出現頻度の関係を解析し、有意な関連性を探した。

3.2 把握実験条件の組み合わせ

返却口の形状として、図6に示す六個のパラメータを設定した。取出口手前側の壁の高さを L_{Hc} 、床と壁のなす角の曲率半径を R_c 、手前の壁の角度を θ_c 、取出口の幅を L_{Wc} 、奥行きを L_{Dc} 、天井の高さを H_c とする。以上のパラメータに、コインを置く位置 P_{Coin} 、コインの大きさ K_{tip} を加え、計八種類のパラメータとなる。 L_{Hc} は 6[mm] (H6) と 30[mm] (H30) の二種類、 R_c は有る ($R_c=15[mm]$ か $6[mm]$) と無い ($R_c=0[mm]$) の二種類、 θ_c は 60[deg]の斜面 (E60) と 90[deg]の直立した壁 (E90) の二種類、 L_{Wc} は、指一本分の幅 30[mm] (W1F) と約4本分の幅 90[mm] (W4F) の二種類、 L_{Dc} は 150[mm] (D150) と 50[mm] (D50) の二種類、 H_c は一般的

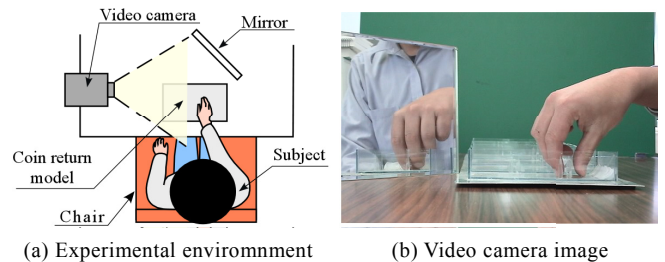


図5. ヒトによる把握動作の実験環境

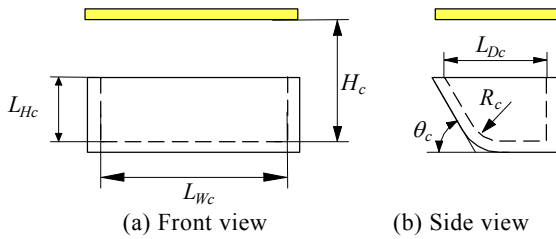


図6. コイン返却口の形状

な成人男性の示指と中指の指先から第二関節までの長さを基準として、制限がある ($H_c=40\sim70[\text{mm}]$) と無い ($H_c=\infty$) の二種類, P_{Coin} は真ん中 (Cp1) と手前 (Cp2) の二種類とする。全ての組み合わせを行うと 128 通りになる。

128 通りの実験パターンの中から重要性の低い組み合わせを取り除く。手前の壁の高さ L_{Hc} が 30[mm] 場合、上空の高さの拘束ありだとコインを取り出すのが困難なので H30 は高さ拘束なしのみ行う。奥行きが短い ($L_{Dc}=50[\text{mm}]$) 場合、コインの置く位置は手前のみとする。最終的に表 1 中の○記号で示す 48 通り (実際には対象物は大きなコインと小さなコインの二種類の対象物で実験を行うので 96 通り) の組み合わせの実験を行う。

図 7 に返却口模型を示す。返却口模型は基本となる六種類のベースがあり、このベースに奥行きや幅を制限する仕切り壁、高さを制限するための天井を取り付けることで 48

表 1. 実験条件の組み合わせ

高さ拘束なし			遠い				近い			
			広い		狭い		広い		狭い	
			真中	手前	真中	手前	真中	手前	真中	手前
高い	角	90deg	○	○	○	○	×	○	×	○
		60deg	○	○	○	○	×	○	×	○
	丸	90deg	○	○	○	○	×	○	×	○
		60deg	○	○	○	○	×	○	×	○
低い	角	90deg	○	○	○	○	×	○	×	○
		60deg	×	×	×	×	×	×	×	×
	丸	90deg	○	○	○	○	×	○	×	○
		60deg	×	×	×	×	×	×	×	×

高さ拘束あり			遠い				近い				
			広い		狭い		広い		狭い		
			真中	手前	真中	手前	真中	手前	真中	手前	
高い	角	90deg	×	×	×	×	×	×	×	×	×
		60deg	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	丸	90deg	×	×	×	×	×	×	×	×	×
		60deg	×	×	×	×	×	×	×	×	×
低い	角	90deg	○	○	○	○	×	○	×	×	○
		60deg	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	丸	90deg	○	○	○	○	×	○	×	×	○
		60deg	×	×	×	×	×	×	×	×	×

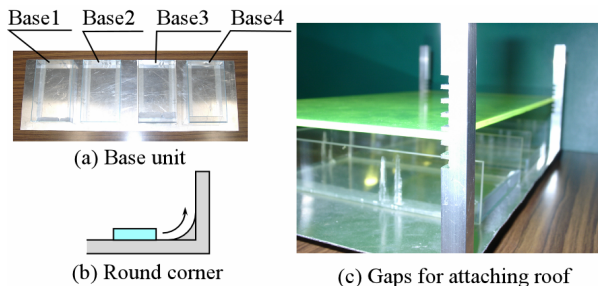


図7. コイン返却口模型

通りの実験を行える。R 有りの場合は図 7 (b) のように手前のエッジに丸みを付けたベースを用いる。高さ拘束あり時に用いるベースは図 7 (c) のように上空の自由を拘束する天井を固定するための溝の入った支柱が四隅に立っている。

3.3 ヒトの把握動作の解析 (把握パターンの分類)

被験者 10 名, 計 960 試行の実験より図 8 に示すパターン A から J の十種類の把握パターンを発見した。

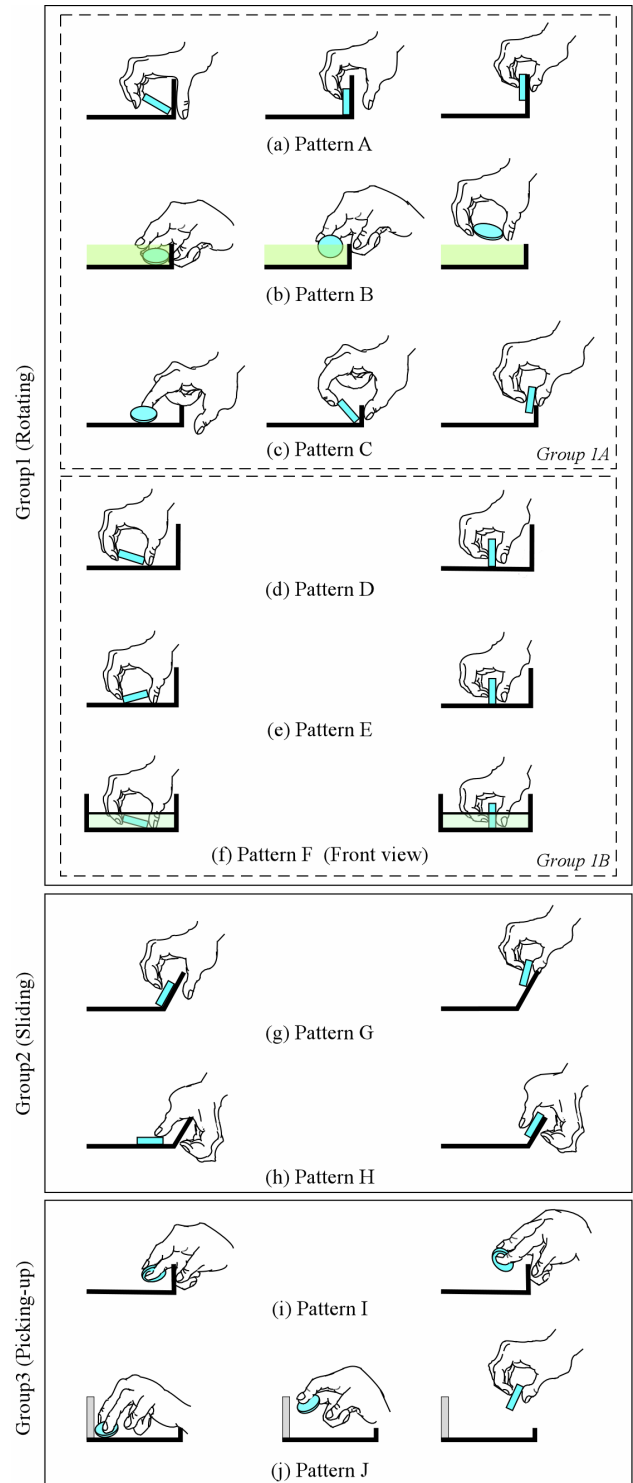


図8. 把握パターン

(パターンA) 示指でコインを前縁まで引きずっていき、コインが前縁に接したところで指先を用いて前縁の角を支点として回転させて壁にコインを密着させる。示指と前縁でコインを挟みながら前縁上を滑らせて持ち上げ、最終的に示指、母指で挟んで持ち上げる。

(パターンB) 示指でコインを模型左側面の角に引きずっていき、コインの左側側面と模型の左側面の接点を支点にしてコインを回転させる。コインが模型の側面に密着したら、模型左側面上を滑らせて返却口の出口まで運び、母指と示指で挟み持ち上げ、最終的に摘み上げる。

(パターンC) 示指指先を用いて模型の前縁と側面の角までコインを滑らせ、示指をL字に曲げて手首を横に倒す。角を支点にしてコインを少し回転させて持ち上げて床との間に隙間を作り、この隙間に示指を潜り込ませる。示指が隙間に入ったら、示指と母指で挟んで持ち上げ、最終的に摘み上げる。

(パターンD) 模型の上からコインを母指と示指指先で挟み、コインが滑り出さないように母指で押さえる。コインの母指側を支点に回転させて床との間に隙間を作り、この隙間に示指を潜り込ませる。母指と示指で挟んで持ち上げ、最終的に摘み上げる。

(パターンE) 模型の上からコインを母指と示指指先で挟み、コインが滑り出さないように示指で押さえる。コインの示指側を支点に回転させて床との間に隙間を作り、この隙間に母指を潜り込ませる。母指と示指で挟んで持ち上げ、最終的に摘み上げる。

(パターンF) 手首全体を正面から見て九十度回転し、コインを横向きに母指と示指指先で挟む。コインが滑り出さないように母指で押さえ、母指指先を支点にしてコインを回転させて床との間に隙間を作り、この隙間に示指を潜り込ませる。母指と示指で挟んで持ち上げ、最終的に摘み上げる。

(パターンG) 示指でコインを前縁に接するまで引きずっていき、コインが前縁に接してもコインを回転させずに斜面を滑り上げていき、母指と示指で挟んで持ち上げ、最終的に摘み上げる。滑りのみを利用する最もシンプルな動作である。

(パターンH) コインを母指で押さえて前縁まで引きずっていき、そのまま斜面上を密着させながら滑り上げる。母指と示指で挟んで持ち上げ、最終的に摘み上げる。

(パターンI) コインを示指と中指で縦に挟み、中指とコインの接点を支点としてコインを回転させて床との間に隙間を作り、この隙間に示指を潜り込ませる。中指の腹と示指の背で挟んで持ち上げ、最終的に摘み上げる。

(パターンJ) コインを示指により模型奥の壁まで滑らせていく。コインが奥の壁まで達したら、コインと奥の壁との接触点を支点にしてコインを回転させて床との間に隙間を作り、この隙間に示指を潜り込ませる。示指の

背にコインを乗せて中指の腹で挟んで持ち上げる。最終的に示指、母指により摘み上げる。

以上の十種類の把握パターンは、大きく三つのグループに分けられる。グループ1 (Rotating Group)はコインを回転させて拾い上げる把握パターンである。グループ1は、さらに二つのグループ、グループ1A (壁を利用してコインを回転させる：パターンA, B, C) とグループ1B (指先を利用してコインを回転させる：パターンD, E, F) に細分化できる。グループ2 (Sliding Group)はコインを手前の斜面上を滑らせて拾い上げる把握パターンで、パターンG, Hを含む。グループ3 (Picking-Up Group)はコインを指先で摘み上げて、ダイレクトに空中に持上げる把握パターンで、パターンI, Jを含む。

3.4 解析結果(把握パターンと把握条件の関係)

以下に、コイン返却口の形状と把握パターンの出現頻度の関係を解析した結果をまとめる。なお、今回用いた大きなコインと小さなコインの間には、把握パターンの出現頻度に明確な違いは現れなかった。以下の解析結果は大きなコインを用いた場合の実験結果に基づいている。

(手前の壁の高さ、取り出し口の幅、奥行き：影響なし)

図9に示すように、模型の前縁の高さが高い場合も低い場合もパターンA, Dが約60[%]を占め、残りをほぼパターンGが占める。出現頻度の傾向がほぼ等しいことから、前縁の高さは把握パターンに影響しないことが分かる。同様に、図10、図11に示すように模型の幅、奥行きも把握パターンに影響しない。

(取り出し口の高さ拘束：Rotating Groupに影響)

図12に示すように、パターンA, D(Rotating Group)はともに高さの拘束があると消失する。その代わりに、パターンA, D, G以外の出現頻度が少なかったパターンが現れる。パターンGは高さの拘束による影響を受けない。以上のことから、高さ拘束の有無はパターンG以外の把握パターンに大きな影響を与えることが分かる。

(角の形状、高さ拘束有り：全ての把握Groupに影響)

図13に示すように、高さ拘束がある場合、全ての被験者はエッジが丸だとSliding Groupを選択するが、エッジが角だとSliding Groupは全く選択されない。その代わりにRotating Group、もしくは出現頻度は少ないがPicking-up Groupを選択する。以上より、高さ拘束がある場合にはエッジの有無が把握パターンの選択に大きく影響を及ぼすことが分かる。

(手前の壁の角度と壁の形状、高さ拘束無し：Sliding Group, Rotating Groupに影響)

図14に示すように、高さ拘束がない場合、Picking-up

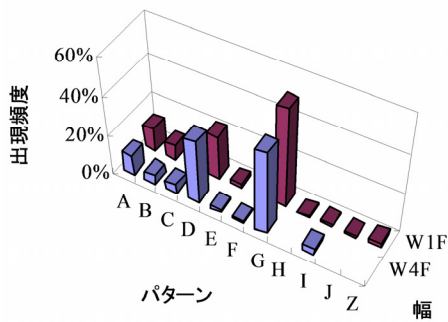


図9 手前の壁の高さの影響

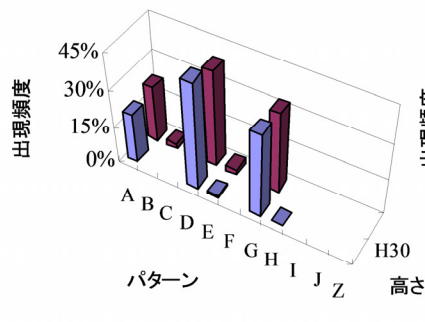


図10 取り出し口の幅の影響

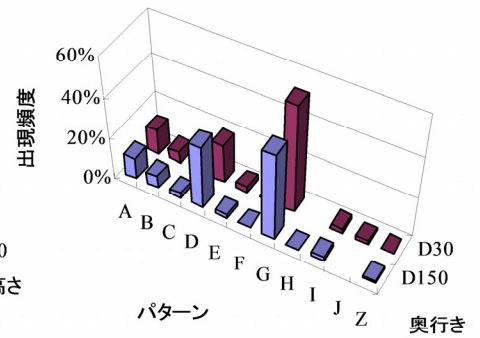


図11 奥行きの影響

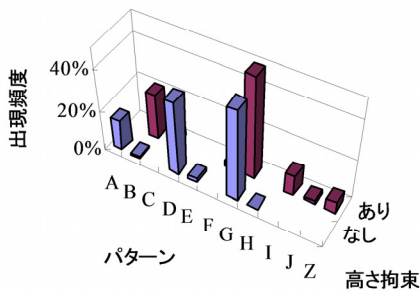


図12 高さ拘束の影響

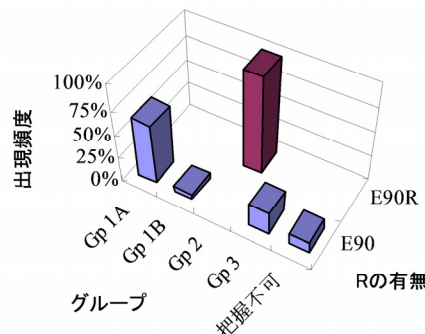


図13 壁(手前)の形状の影響
(高さ拘束有り)

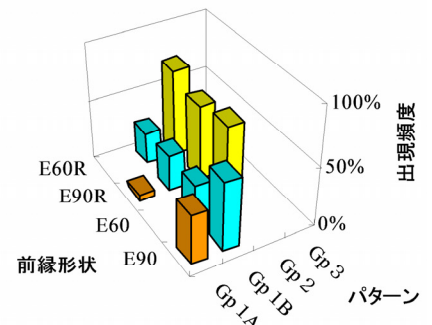


図14 壁(手前)の形状の影響
(高さ拘束無し)

Group は選択されない。模型の前縁の角度が 90[deg]でエッジが角の場合は Sliding Group も全く選択されず、代わりに Rotating Group が選択される。模型の前縁の角度が 60[deg]もしくはエッジが丸の場合は Sliding Group が選択される。以上のことより高さ拘束がない場合には、模型の前縁の角度とエッジの形状が把握パターンの出現頻度に影響を与えることが分かる。

以上の解析結果を元にして、ヒトがどのようなパラメータに基づいて、把握パターンを選択しているのかを図 15 の把握戦略フロー図にまとめる。把握パターンは、コインを把握する環境の上方の高さの拘束の有無に、最も大きな影響を受ける。高さの拘束がある場合、グループ 3 (Picking-Up)は選択されない。これは、高さの拘束がある場合、狭い空間内には、示指に加えて母指も差し入れる余裕が無いためである。逆に、高さの拘束が無い場合、グループ 1A (手前の壁を利用してコインを回転させる) は選択されない。手前の壁のエッジが丸い、もしくは斜面が 60[deg]

の場合、グループ 2 (Sliding group)が選択される。グループ 2 は最もシンプルな動作なので、可能な条件が揃っていれば多くの被験者が好んで選択する。一方、斜面が 90[deg]でエッジが角の場合は、グループ 2 は選択されない。これは滑り上げ動作では、床から壁へコインを遷移できないためである。

このフロー図は多指ロボットハンドによる把握パターンの選択アルゴリズムにも応用できる。多指ロボットハンドでコインを取り出す際に、まずどの把握戦略から試せば把握動作を成功できる可能性が高いのか、把握環境の情報に基づいて推論する基本ルールとなる。

4. 画像計測によるコイン形状対象物把握動作の解析

4.1 画像計測を行なう目的および実験方法

ビデオモニタ上の目視による把握パターンの分類とは別に、各把握パターンの動作の本質を抽出するために画像計測による把握動作の詳細な解析も行った。目視では細かな動作、ゆっくりした動作の変化を捉えるのが困難であることに加え、観察者の主観の影響による歪曲や見落としの生じる可能性がある。把握動作を定量的に解析することで、代表的な把握パターンにおける各指の役割を明らかにする。

図 16 (a)中の黒丸で示した被験者の母指、示指の各関節部と指先および手首の計八箇所に、マジックでマークを付ける。その状態で被験者にコインを把握してもらい、一連の動作をデジタルビデオカメラで横方向から撮影する。撮影したビデオ映像は IEEE1394a インターフェースを介して

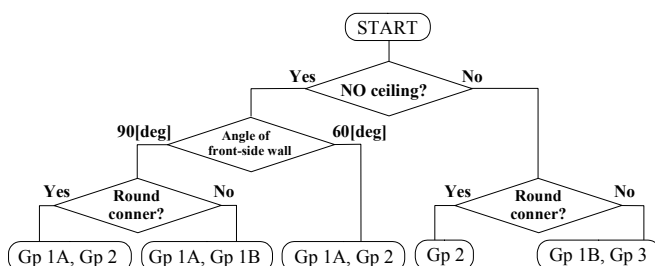


図15 把握戦略フロー図

パーソナルコンピュータに AVI 形式で取り込み、動画編集ソフトウェアを用いて映像の各フレームをビットマップ形式の画像データに分解し、保存する。本研究室で開発した画像計測用ソフトウェア BMP_measure を用いて、各画像中の全マーカの x, y 座標およびコイン左右端の x, y 座標を計測する。得られた x, y 座標から各関節の角度を計算し、把握動作時のヒトの手指、手首、コインの挙動の時系列変化を獲得する。各関節の角度は図 16 (b) に示すように指をまっすぐに伸ばしている状態を $0[\text{deg}]$ とし、反時計方向を正とする。

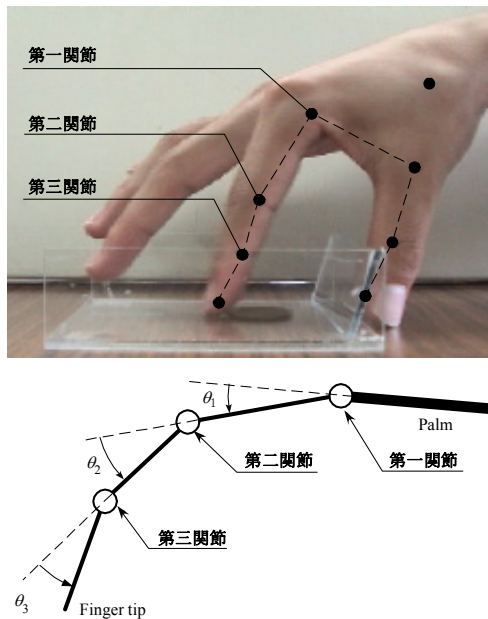


図 16. 画像計測時のマーカと座標系

4.2 計測結果

発見した十個の把握動作の中から動作がシンプルな Sliding Group に属するパターン G (以下, Sliding 動作) と Rotating Group に属するパターン A (以下, Rotating 動作) の解析結果を示す。各パターンの動作は図 17 に示すように三つの位相に分けられる。Sliding 動作の第一位相はコインを初期位置から前縁に接触するまで滑らせる動作、第二位相はコインを床面から斜面に移す動作、第三位相はコ

インを斜面に押し付けながら滑り上げる動作である。同様に, Rotating 動作の一連の把握動作も第一位相はコインを初期位置から前縁に接触するまで滑らせる動作、第二位相はコインを回転させて床面から前縁に移す動作、第三位相はコインを前縁に押し当てながら滑り上げる動作である。

同一被験者による Sliding 動作と Rotating 動作の計測結果を図 18 に示す。Sliding Group の第一位相では第 1 関節の角度が一定の変化量で増加している。他の関節はほとんど変化しないで初期姿勢を保っている。コインを滑らせて手前に運ぶ動作は、第二、第三関節を固定し、第一関節だけを変化させれば良いことが分かる。第二位相では第一関節はほとんど変化していない。第二、第三関節は動作の途中で共に少しだけ瞬間的に変化し、その後、角度を維持し続けている。コインが床面から斜面へ移り変わる瞬間に角度が変化していることを実際の映像でも確認した。コインを床面から斜面へ移す動作を行うには、コインが斜面に接触後、第二、第三関節を曲げ始め、コインが斜面に平行になったら指は動かさず手首全体を持ち上げていることが分かる。第三位相は、第一関節が戻ると同時に、第二、第三関節が大きく曲がり、その後は全関節の角度を維持し続けている。コインを斜面上で滑り上げるには、第二、第三関節を大きく曲げると同時に第一関節を戻せば良いことが分かる。

Rotating 動作の第一位相では Sliding 動作と同様に、第一関節の角度が一定の変化量で増加している。その後の戦略の違いは、この段階では動作に現れていない。第二位相では、第一関節を戻しながら第二、第三関節を曲げてコインを回転させる準備動作(Preshaping)を行う。次にコインを回転させるのだが、この動作中はすべての関節を固定し、手首全体を回転させている。そしてコインと床面に隙間ができたらし指指先をその隙間に滑り込ませる動作に入る。この時、第一関節を曲げると同時に、第二、第三関節を伸ばすことで示指指先を滑り込ませる動作を実現している。最後の第三位相は、すべての関節を固定し、手全体を手前の壁に沿って上げることで実現している。

Sliding 動作と Rotating 動作を比較してみると、第一位相はどちらの動作も第二、第三関節をほぼ変化させず、第一関節のみを変化させる同一の動作を行っている。第二位相

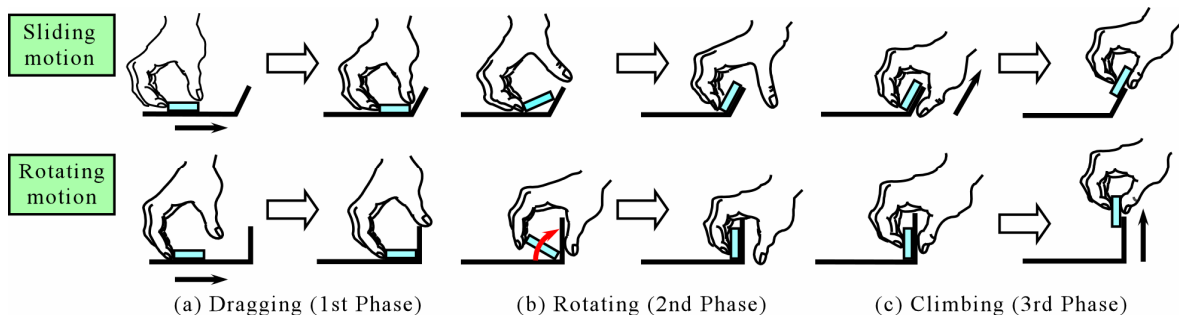
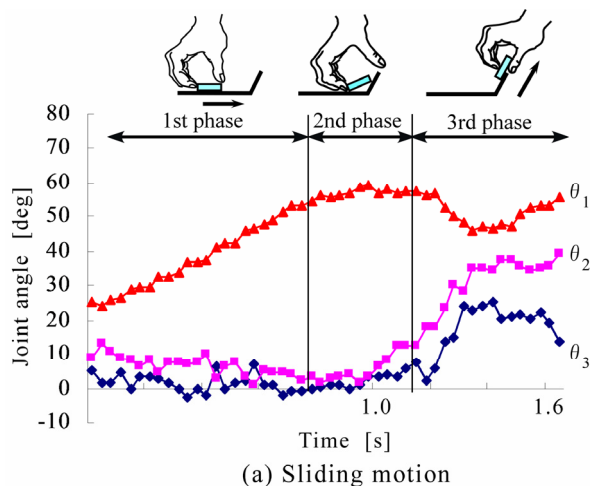
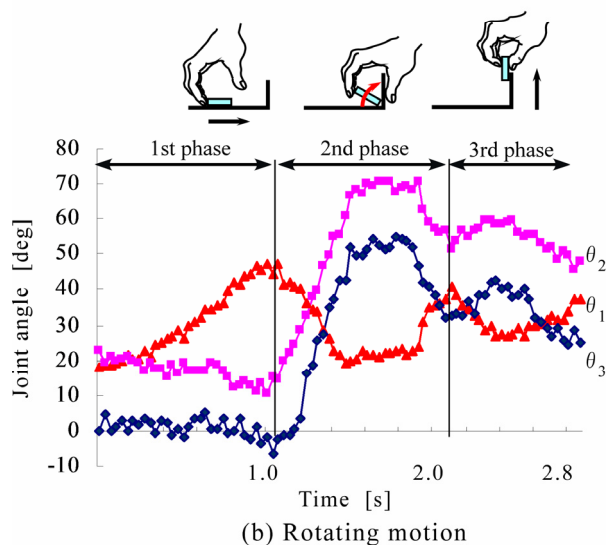


図 17. 把握動作の三つの位相



(a) Sliding motion



(b) Rotating motion

図18. 各関節の角度変化

では、Sliding 動作は全関節をほとんど動かさないのに対し、Rotating 動作は各関節角度が複雑に変化している。Sliding 動作では第二、第三関節が途中で瞬間的に微少量だけ変化しているが、Rotating 動作では第二、第三関節は曲げてから固定し、最後に少し伸ばしている。Sliding 動作は指姿勢ではなく、指先力の大きさと方向のコントロールが重要であるのに対して、Rotating 動作では指先力だけではなく積極的な指姿勢のコントロールも必要であることが分かる。第三位相は、コインを壁に沿って滑り上げるという、どちらの把握パターンでも同一目的の動作なので各関節の変化もそれぞれ似ていると予想されるが、実験結果を見ると実際の挙動は違うことが分かる。図19(a),(b)に示すように、第二位相の最後姿勢は、Sliding 動作と Rotating 動作では大きく異なり、滑り上げる斜面の角度もそれぞれ異なる。第三位相は、滑り上げる斜面の角度、第二位相での最後の姿勢が大きく影響していると考えられる。

それぞれの動作を特徴付けているのは第二位相の各関節角度の変化である。Sliding 動作の方が Rotating 動作より

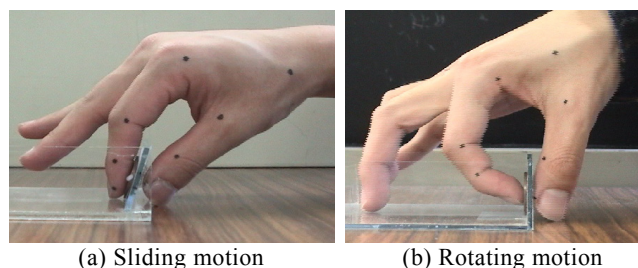


図19. 第2位相の最終姿勢

も全動作時間に占める第二位相の割合および所要時間が少ない上に、各指関節の角度変化が少なく、動作が単調であることから、ヒトにとって Sliding 動作は Rotating 動作に比べて行い易い動作であることが画像計測結果からも分かる。

5. まとめ

十人の被験者に対して 96 通りの把握実験を行った。ビデオカメラで把握動作を観察し、ヒトがコイン返却口からコインを取り出す際の把握パターンが十種類あることを明らかにした。さらに、コイン返却口形状と把握パターンの関連性を解析した。解析結果に基づいて、ヒトがコイン形状対象物をコイン返却口から取り出す際に把握環境に応じてどのような把握戦略を選択する傾向が強いのかをまとめたフロー図を得た。画像計測により、Sliding 動作時と Rotating 動作時の指姿勢の変化を詳細に計測し、ヒトにとって Rotating 動作に比べて Sliding 動作の方が行い易い動作であることを定量的に明らかにした。

なお、本研究は科学研究費（若手研究B）の補助を受けて行なったものである。

参考文献

- [1] Salisbury, J.K. and Craig, J.J. : "Articulated Hands : Force Control and Kinematics Issues", Proc. of JACC, TA-2C, 1981.
- [2] Jacobson, S.C., et al. : "The UTAH/MIT Dexterous Hand : Work in Progress", Int. J. of Robotics Research, pp. 21-50, 1984.
- [3] 川崎, 内山, 小松 : 「研究用プラットフォームをめざした分布型触覚センサを有する人間型ロボットハンド」, 日本機械学会論文集 066 巻 651 号 C 編, 2000.
- [4] Kawasaki, H., Shimomura, H. and Shimizu, Y. : "Educational-Industrial Complex Development of Anthropomorphic Robot Hand Gifu Hand", Advanced Robotics, Vol. 15, No.3, pp.357-363, 2001.
- [5] 山野, 前野 : 「超音波モータと弾性要素を用いた 5 指ロボットハンドの開発」, 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.8, pp.59-67, 2005.
- [6] 松岡, 長谷川, 本田, 桐木 : 「作業状態観測と評価に基づく多関節多指ハンド物体操作システム」, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.5, pp.696-703, 1999.
- [7] 白井, 金子, 辻 : 「スケール依存型把握」, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.4, pp.567-576, 1999.
- [8] 白井, 金子, 原田, 辻 : 「対象物の引き剥がし支援動作 (DAM) の発見とロボットハンドへの応用」, 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No. 1, pp.57-64, 2002.